

На правах рукописи

**Гаврилов Александр Геннадьевич**

**Исследование системы «пласт-скважина» методом  
высокочастотных фильтрационных волн давления**

01.04.03 «Радиофизика»

25.00.29 «Физика атмосферы и гидросферы»

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата физико-математических наук**

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Казанский государственный университет им. В.И.Ульянова- Ленина"

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, доцент  
Овчинников Марат Николаевич

Научный консультант Кандидат физико-математических наук, доцент  
Штанин Александр Васильевич

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,  
профессор Смоляков Борис Петрович,  
Доктор технических наук  
Кравцов Яков Исаакович

Ведущая организация: Институт механики и машиностроения  
Казанского Научного Центра РАН.

Защита состоится «14» ноября 2007 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного Совета Д212.081.18 в Казанском государственном университете по адресу 420008, Казань, Кремлевская, 18, физический корпус, ауд. 210.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» октября 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Карпов А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Развитие научных основ разработки нефтяных месторождений связано в значительной степени с разработкой и внедрением принципов оптимизации гидродинамического и физико-химического режимов выработки продуктивных пластов. Для реализации этих принципов необходима достоверная, дифференцированная по площади и толщине пласта геологическая, геофизическая и гидродинамическая информация об объекте эксплуатации: начальная, снятая в период его разведки, и текущая, получаемая с требуемой частотой в процессе выработки. Поэтому вопросы разработки экспресс-методов исследования насыщенных пористых пластов, интерпретации их результатов, создания автоматизированных комплексов контроля и управления фильтрационными потоками, проведения мониторинга месторождений являются актуальными, а их практическая реализация востребована производством.

**Цель работы:** Разработка методики, проведение экспериментов и интерпретация результатов исследований фильтрационных параметров насыщенных пористых пластов методом фильтрационных гармонических волн давления в широком, включая миллигерцовый, диапазоне частот с использованием современной радиоэлектронной аппаратуры.

**Новизна.** Впервые обоснованы условия проведения и осуществлены эксперименты по исследованию пористых сред методом фильтрационных волн давления в режиме самопрослушивания скважин с периодами колебаний от десятков секунд до десятков минут.

**Достоверность** полученных результатов обосновывается использованием апробированных методик обработки результатов экспериментальных исследований, корректным использованием методов математической физики и статистики, согласованием

экспериментальных данных с теоретическими представлениями о фильтрационных волновых процессах в пористых средах.

**Научная** значимость работы связана с расширением (до  $10^{-1}$  Гц) частотного диапазона использования метода фильтрационных волн давления при исследованиях насыщенных пористых сред и получением новых возможностей для анализа значений гидропроводности в прискважинной зоне.

**Значимость практическая** заключается в возможности определения по результатам разработанных методик гидродинамических параметров призабойной пласта волновыми экспресс-методами с одновременным определением ее зональных неоднородностей. Результаты работы были использованы для контроля разработки ряда нефтяных месторождений, в том числе на основе лицензионных соглашений по патенту РФ.

**Апробация.** Результаты работы докладывались на семинарах кафедры радиоэлектроники физического факультета Казанского государственного университета, итоговых научных конференциях КГУ, III Всесоюзном семинаре по современным проблемам теории фильтрации (Москва, 1989), Республиканском научно-техническом семинаре по проблемам автоматизации процессов разработки нефтяных месторождений (Казань, 1983), Международном форуме по проблемам науки, техники и образования (Москва, 2001), Международной научно-практической конференции по проблемам повышения нефтеотдачи пластов на поздней стадии разработки нефтяных месторождений и комплексное освоение высоковязких нефтей и природных битумов (Казань, 2007), конференции по новой технике промысловых исследований (Казань, 1977), Всесоюзной конференции по народно-хозяйственным и методическим проблемам геотермии (Махачкала, 1978), конференции «Нетрадиционные коллекторы нефти, газа и природных битумов» (Казань, 2005, Научно-технической

конференции по проблемам совершенствования разработки нефтяных месторождений (Альметьевск, 1983).

**Вклад автора** заключается в разработке методик проведения исследований и создании элементов экспериментальной измерительной аппаратуры, личном проведении натурных экспериментов, создании аппроксимационных методик для расчетов параметров пластов, интерпретации полученных результатов.

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 31 работа, включая 12 статей, из них 4 в рецензируемых научных журналах, также получены авторское свидетельство и патент.

**Структура и объем.** Работа включает в себя 101 страницу текста, список библиографии из 90 наименований, состоит из введения, 3 глав и заключения.

На защиту выносятся следующие **основные положения:**

1. Методика проведения гидродинамических исследований системы пласт- скважина, основанная на применении фильтрационных гармонических волн давления в диапазоне частот  $10^{-1}$ - $10^{-5}$  Гц и использующая автоматизированную систему контроля гидродинамических параметров.
2. Результаты анализа значений дебитов и давлений, синхронно по времени измеренных на устье и забое скважины при проведении гидродинамических исследований, в том числе, методом высокочастотных фильтрационных волн давления и выводы о возможностях использования устьевой аппаратуры взамен глубинной.
3. Алгоритмы расчетов и результаты экспериментальных исследований фильтрационных параметров пластов при проведении гидродинамических исследований методом самопрослушивания

скважин в широком диапазоне значений безразмерного параметра  $10^{-4} < Z_c = r_c \sqrt{\omega/\chi} < 50$  для различных типов флюидонасыщенных коллекторов.

4. Способ определения прискважинной зональной неоднородности пласта, основанный на методе зондирования ее высокочастотными фильтрационными волнами давления, позволяющий рассчитывать значения гидропроводности на расстояниях  $10^{-1}$ - $10^2$  метров от скважины.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Диссертация состоит из введения, трех глав и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, проведен литературный обзор, сформулирована цель работы, кратко изложены полученные результаты.

Из всех гидродинамических методов по качеству получаемой информации следует выделить метод фильтрационных (гармонических) волн давления (ФВД), являющийся наиболее помехоустойчивым, информативно емким и достоверным. Впервые метод ФВД для определения фильтрационных параметров пласта в случае прямолинейно-параллельной фильтрации был предложен Э.Б. Чекалюком. Позже была решена задача распространения ФВД для случаев плоскорадиальной фильтрации без учета начальных условий, получены точные и асимптотические соотношения для расчета фильтрационных параметров по гидропрослушиванию пласта.

Одной из важных и трудоемких задач в оптимизации гидродинамического режима выработки пласта и оценки эффективности методов воздействия на пласт является контроль за состоянием призабойной зоны скважины. Метод самопрослушивания скважины, а

точнее системы "пласт - скважина", с помощью ФВД на «высоких» (в гидродинамическом смысле) частотах (период воздействия  $T < 1000\text{с}$ ), выделился в самостоятельную область гидродинамических исследований, использующих волновые радиофизические методы исследования природных сред.

В п.1.1 первой главы описана аппаратура, применяемая для промысловых гидродинамических исследований. В п.1.1.2. дано подробное описание комплекса первичной и вторичной регистрирующей аппаратуры – Автоматизированной Системы Контроля (АСК)», применяемой для самопрослушивания системы пласт-скважина методом высокочастотных фильтрационных волн давления. В разработке современных АСК основной упор делается на компьютеризацию, миниатюризацию и разработку специального программного обеспечения. Периодические во времени близкие к синусоидальному виду периодические колебания потока жидкости задаются специальным крановым устройством, приводимым в движение шаговым электродвигателем, управляемым, в свою очередь, специальным электронным блоком управления [19]. Период задаваемых колебаний лежит в диапазоне от 20 секунд до 24 часов (минимальный – 10 секунд). Давление на устье и забое скважины измеряется и регистрируется устьевыми и глубинными электронными дистанционными манометрами с необходимым классом точности. Расход (дебит) закачиваемой в скважину и изливаемой из скважины жидкости измеряется расходомерами тоже наземного и глубинного исполнения. Блок вторичной регистрирующей аппаратуры имеет два варианта исполнения. На рис.1 приведена схема комплекса сбора и регистрации данных гидродинамических исследований по самопрослушиванию.



Рис.1. Структурная схема комплекса для сбора и регистрации данных.

В п.1.2. главы 1 представлена методика проведения самопрослушивания системы «пласт-скважина». Описание методики разделено на три подраздела.

В п.1.2.1. описаны мероприятия по подготовке скважины и пласта к эксперименту. Эти мероприятия зависят от режима ее эксплуатации и вида оборудования, от свойств жидкости заполняющей пласт, от величины пластового давления, а также от величины необходимого радиуса дренирования. До проведения исследований скважина останавливается, проводятся необходимые мероприятия по установке



контрольно-измерительной аппаратуры, при низких пластовых давлениях проводится замена жидкости в стволе скважины на негазированную жидкость с меньшей плотностью. Для самопрослушивания нагнетательных скважин, если позволяет величина пластового давления, можно использовать два принципиально разных режима их работы – режим нагнетания и режим излива.

В п.1.2.2. описан порядок проведения промыслового эксперимента на примере исследования нагнетательной скважины 6209 Ромашкинского нефтяного месторождения (рис.2) и нефтяных скважин 33 и 34 Ушаковского нефтяного месторождения, эксплуатирующихся фонтанным способом.

Решены два основных методических вопроса:

- чем и как задавать ФВД в системе «пласт- скважина»;
- где и каким образом измерять давление и дебит, используемые при расчете параметров призабойной зоны пласта.

В п.1.2.3. описан способ анализа и обработки получаемых экспериментальных данных методом Фурье-анализа. В рассматриваемом случае этот метод применяется при обработке графиков  $q(t)$  и  $P(t)$  с целью определения значений амплитуды и фазы гармонических составляющих спектров колебаний дебитов и давлений.

Гл.2 посвящена описанию теории метода ФВД и интерпретации результатов гидродинамических исследований пласта в режиме самопрослушивания.

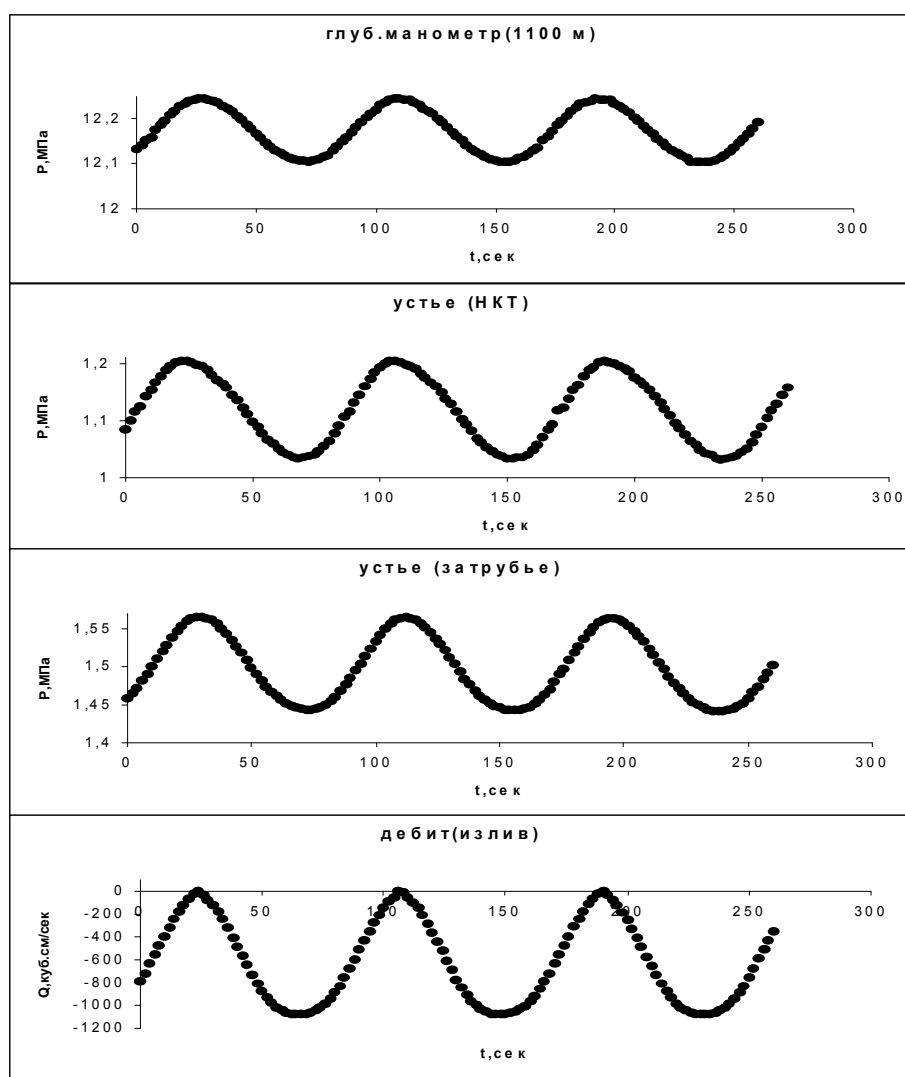


Рис.2. Пример одновременного измерения дебита и давления.

В п.2.1. дана подборка наиболее применяемых в сегодняшней практике обработки промыслового материала моделей фильтрации. Это известные модели Щелкачева В.Н., Христиановича С.А., Баренблатта Г.И., Молоковича Ю.М. и др. К сожалению, получить аналитические формулы расчета фильтрационных параметров возможно лишь для классической модели фильтрации. Расчет параметров по другим моделям возможен только по формулам, полученным для асимптотических решений, либо задача решается численными методами на ЭВМ.

Расчетные формулы классической модели упругого режима

фильтрации даны в п.2.2. Аналитические выражения для интерпретации результатов экспериментальных исследований с использованием рассматриваемого метода были получены и исследованы С.Н.Бузиновым и И.Д.Умрихиным и Ю.М.Молоковичем.

В рамках «классической» модели упругого режима фильтрации движение жидкости в пласте осуществляется по закону Дарси

$$\overline{W} = -\frac{\kappa}{\mu} \text{grad} P, \quad (1)$$

Для определения гидродинамических параметров системы «пласт-скважина» служат расчетные соотношения:

$$\chi / r_c^2 = \omega_n / X_{cn}^2 = 2\pi / T_n X_{cn}^2, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{q_n}{2\pi P_{cn} X_{cn}} \left[ \frac{Ker^2 X_{cn} + Kei^2 X_{cn}}{Ker_1^2 X_{cn} + Kei_1^2 X_{cn}} \right]^{1/2}. \quad (3)$$

Если значения безразмерного параметра  $X_{cn} \ll 1$ , то для расчета параметров можно воспользоваться приближенными формулами:

$$\delta_{cn} = \text{arctg} \frac{\pi}{4 \ln 2 / \gamma X_{cn}}, \quad (4)$$

$$\chi / r_c^2 = (\gamma / 2)^2 \omega_n \exp(\pi / 2 \text{tg} \delta_{cn}), \quad (5)$$

$$\varepsilon = q_n / 8 P_{cn} |\sin \delta_{cn}|. \quad (6)$$

Здесь  $k$  – коэффициент проницаемости,  $\mu$  – вязкость жидкости,  $r_c$  – приведенный радиус скважины,  $h$  – толщина пласта,  $P$  – давление,  $\varepsilon = kh/\mu$  – коэффициент гидропроводности пласта,  $\chi$  – пьезопроводности пласта,  $\omega$  и  $T$  – круговая частота и период колебаний,  $X_{cn}$  – безразмерный параметр,  $Ker X$ ,  $Kei X$  – функции Томсона,  $\delta_{cn}$  – сдвиг фаз между  $n$ -ми гармониками дебита и давления,  $q_n$  – амплитуда  $n$ -ной гармоники дебита,  $P_{cn}$  – амплитуда  $n$ -ной гармоники давления.

В п. 2.3. проведен анализ и интерпретация результатов исследований, проведенных на скважинах 6209 (рис.3), 33 и 34 в рамках выше описанной классической модели упругого режима фильтрации.

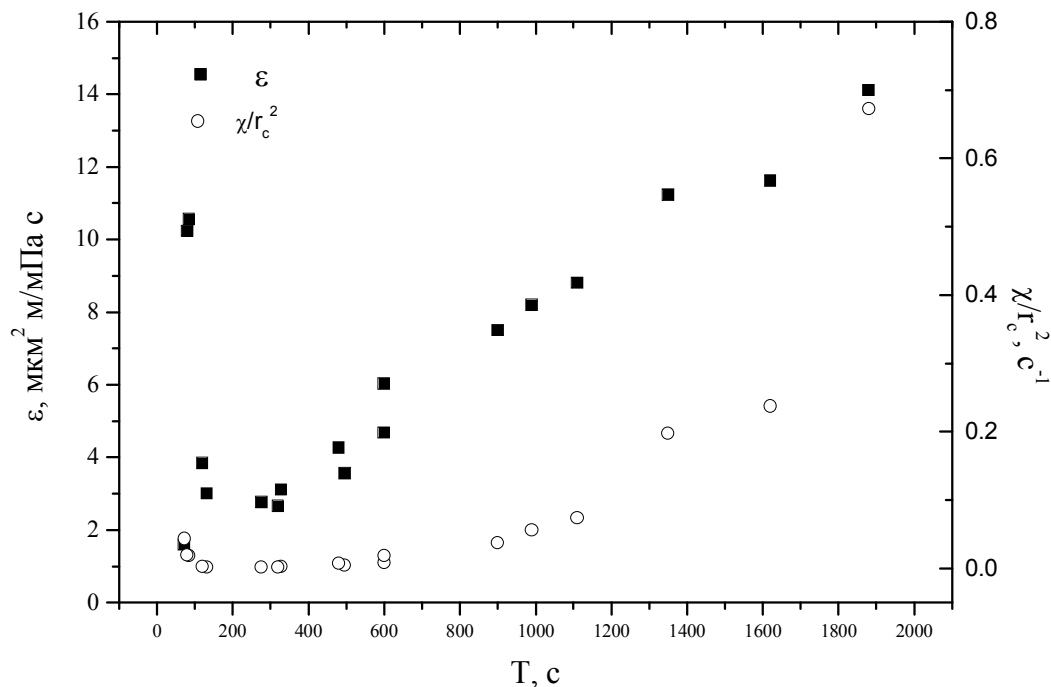


Рис.3. Расчетные значения гидропроводности  $\varepsilon$  и параметра  $\chi/r_c^2$  с учетом поправок в зависимости от периода колебаний дебита.

Третья глава посвящена практическому применению метода самопрослушивания призабойной зоны скважины на примерах различных типов скважин и пластов. В п.3.1, 3.2 и 3.3 приводится описание программы выделения непериодической составляющей и гармонический анализ периодической составляющей колебаний, методики расчета поправки к вычислению разности фаз между гармониками давления и дебита и использования на практике «точных» формул классической модели упругого режима фильтрации.

П.3.4 посвящен описанию условий проведения натуральных экспериментов, приводятся примеры расчетов и анализа

экспериментальных данных, представленных в графической и табличной формах.

### **Выводы и заключение.**

1. Разработана оригинальная методика для проведения гидродинамических исследований системы пласт-скважина методом фильтрационных гармонических волн давления с использованием автоматизированной системы контроля гидродинамических параметров для широкого интервала частот ( $10^{-1}$ - $10^{-5}$  Гц) воздействия на пласт, включая миллигерцовый диапазон.
2. По результатам синхронизированных во времени измерений дебитов и давлений на устье и забое скважины исследованиях системы пласт-скважина методом высокочастотных фильтрационных волн давления сделаны выводы и рекомендации о возможностях использования устьевой аппаратуры взамен глубинной в нагнетательных скважинах и эксплуатационных скважинах с фонтанным способом эксплуатации.
3. Полученные экспериментальные результаты и результаты численного анализа решений уравнения пьезопроводности показывают необходимость использования его точных решений при интерпретации результатов высокочастотного зондирования насыщенного пористого пласта гидродинамическими волнами давления при значения параметра сдвига фаз между значениями соответствующих гармоник дебитов и давлений  $\Delta > 0.2$  и детального учета гидродинамических колебаний столба жидкости в самой скважине при расчетах гидропроводности и комплексного параметра, связанного с пьезопроводностью-  $\chi/r^2 c$ . Разработана оценочная методика сведения измеренных в скважине значений давлений и расходов жидкости в скважине к пластовым условиям,

учитывающая динамические колебания жидкости в стволе скважины.

4. Показаны пределы применимости традиционных методик расчетов фильтрационных параметров пластов в части использования аппроксимаций бесселевых функций и разработаны эффективные алгоритмы расчетов фильтрационных параметров пласта при проведении гидродинамических исследований методом фильтрационных волн давления в режиме самопрослушивания в диапазоне значений безразмерного параметра  $10^{-4} < Z_c = r_c \sqrt{\omega/\chi} < 50$  для различных типов флюидонасыщенных коллекторов. Результаты расчетов были использованы при проведении промысловых экспериментов, для контроля текущего состояния разработки и построения постоянно действующих моделей ряда нефтяных месторождений Республики Татарстан.
5. Разработан и обоснован способ определения прискважинной зональной неоднородности пласта по результатам его зондирования методом самопрослушивания высокочастотными фильтрационными волнами давления, основанный на поэтапном увеличении зоны зондирования путем перехода от периодов воздействия от  $10^2$  до  $10^4$ - $10^5$  секунд.

Постоянное обсуждение результатов, внимание и помощь научного руководителя внс Овчинникова М.Н., научного консультанта доц. Штанина А.В., профессора Непримерова Н.Н., зав. кафедрой профессора Насырова А.М., плодотворное сотрудничество с доц. Ходыревой Э.Я., ст. преп. Евтушенко С.П., ст.преп. Сайкиным К.С., внс Куштановой Г.Г., внс Христофоровой Н.Н., доц. Христофоровым А.В., участие инженеров Костериной И.К., Гараевой Л.М., Матюшкина И.Ф., Давлетшина Ф.И.,

Бойкова В.И., Сомова А.И. и других сотрудников кафедры радиоэлектроники в осуществлении промысловых экспериментов способствовали решению рассматриваемых в работе проблем. Считаю своим долгом выразить всем искреннюю благодарность.

### **Список основных работ по теме диссертации.**

1. Разработка нефтяного месторождения как комплексная междисциплинарная технология / Овчинников М.Н., Гаврилов А.Г., Непримеров Н.Н., Штанин А.В. // Научные технологии. –2004.- Т.5, №4.- С. 20-26.
2. Результаты математического моделирования процесса выработки остаточных запасов заводненных зон на примере участка Центрально-Азнакаевской площади. Дифференциальный геолого-промысловый анализ, постоянно действующая модель и технологическая схема разработки месторождений / Овчинников М.Н., Гаврилов А.Г., Непримеров Н.Н., Прошин Ю.Н., Чекалин А.Н., Штанин А.В. //Георесурсы.- 2001.- № 4.-С. 33-34.
3. Гаврилов А.Г., Марданшин А.Н., Штанин А.В. Использование фильтрационных волн давления при доразработке участка Центрально-Азнакаевской площади.// Научно-технический журнал “Георесурсы”.-4(21).-2006.-С.21-22.
4. Гаврилов А.Г., Марданшин А.Н., Овчинников М.Н., Штанин А.В. Исследования призабойной зоны скважины методом высокочастотного фильтрационного зондирования. // Электронный журнал “Нефтегазовое дело”.-2006.: [http://www.ogbus.ru/authors/Gavrilov/Gavrilov\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Gavrilov/Gavrilov_1.pdf), свободный.
5. Экспериментальные исследования фильтрационных параметров пластов на режимах гидродинамического самопрослушивания и

взаимодействия скважин / Овчинников М.Н., Гаврилов А.Г., Штанин А.В., Гарипов Б.М. // Труды международного форума по проблемам науки, техники и образования.- М. Академия наук о Земле, 2001.- Т.3.- С.151-152.

6. Гаврилов А.Г., Закиров Р.Х., Штанин А.В. Изменение фильтрационных параметров пласта в процессе эксплуатации ячейки и зависимостей от пластового давления.// Исследования по подземной гидромеханике.-Казань: Изд. Казанского ун-та, 1983.- Вып.6.-С.19-25.
7. Гаврилов А.Г., Ларионов М.В., Штанин А.В. Определение положения фронта нагнетаемой воды в неоднородных по толщине пластах.// Исследования по подземной гидромеханике. - Казань: Изд. Казанского ун-та, 1983.-Вып.5.-С.32-41.
8. Гаврилов А.Г., Штанин А.В. Гидродинамические исследования трещиновато-пористых коллекторов// Исследования по подземной гидромеханике.-Казань: Изд. Казанского ун-та, 1983.-Вып.7.-С.36-44.
9. Гаврилов А.Г., Штанин А.В. Изучение гидродинамических параметров неоднородного по толщине нефтяного пласта.//Исследования по подземной гидромеханике.-Казань: Изд. Казанского ун-та, 1983.-Вып.5.-С.24-31.
10. A.G.Gavrilov, M.N.Ovchinnikov, A.V.Shtanin. Geological structures recognition and evaluation of water saturation in oil fields by the hydrodynamical methods// Proc.Int.Conf. Geometrization of Physics IV, October 4-8 -Kazan, 1999.-P.208-210.
11. Hydrodynamic methods for evaluation of field of saturation by the oil a stratum / Gavrilov A.G., Neprimerov N.N., Ovchinnikov M.N., Shtanin A.V. // Annales XXIIIrd General Assembly European Geophysical Society, Nice, 20-24 April, 1998.- Supplement. Part II.-P.497.



12. Гаврилов А.Г., Закиров Р.Х., Ларионов М.В., Штанин А.В. Автоматизированная система контроля за выработкой пласта.//Проблемы автоматизации процессов разработки нефтяных месторождений: Тезисы докл. Республиканского научно-технического семинара.-Казань.-1983.-С.45.
13. Гаврилов А.Г., Овчинников М.Н., Штанин А.В., Панарин А.Т. Актуальные вопросы использования гидродинамических методов контроля и увеличения нефтеотдачи пластов. Труды научно-практической конференции, посвященной 50-летию открытия девонской нефти Ромашкинского месторождения, Бугульма, 25-26 ноября 1997г., с.125-128.
14. Гаврилов А.Г.,Штанин А.В. Аппаратура для гидродинамических исследований пластов и скважин.//Новая техника промысловых исследований: Тезисы докл.. Казань. 1977.-С.33-34.
15. Гаврилов А.Г., Штанин А.В. Аппаратура и методика проведения промысловых гидродинамических исследований пластов и скважин.//Сб. Некоторые вопросы контроля разработки нефтяных месторождений.-ПК физфака КГУ.-Казань.-2004.-С.45-56.
16. Овчинников М.Н., Гаврилов А.Г., Куштанова Г.Г., Семенов А.В., Штанин А.В. Особенности применения периодических гидродинамических режимов при разработке трещиновато-пористых коллекторов.// Материалы Международной научно-практической конференции.-Казань.-Изд-во «Фэн».-2007.-С.477-487.
17. Овчинников М.Н., Куштанова Г.Г., Гаврилов А.Г. Кривые восстановления давления в коллекторах со сложной реологией. Труды конференции «Нетрадиционные коллекторы нефти, газа и природных битумов», Казань, изд-во КГУ, 2005. –с.212-214.

18. Радиоэлектронные устройства, фильтрационные потоки и компьютерное моделирование в разработке нефтяных месторождений. Гаврилов А.Г., Непримеров Н.Н., Овчинников М.Н., Штанин А.В. Конференция физического факультета, к 200-летию КГУ, 10 ноября 2004 г. Сб. С 126.
19. Гаврилов А.Г., Матюшкин И.Ф., Штанин А.В. и др. Устройство для регулирования потока жидкости. Авт. св-во №1626035.-1990.
20. Гаврилов А.Г., Непримеров Н.Н., Панарин А.Т., Штанин А.В. Патент РФ №2099513. «Способ выработки нефтяного пласта». 1997г.